

# Wärmespeicher: Rolle im Energiesystem der Zukunft

**Dr. Andreas Hauer • ZAE**

**Dr. Antje Wörner • DLR**

**Stefan Kranz • GFZ**

**Patrick Schumacher • IBP**

**Stefan Gschwander • ISE**

**Jan von Appen und Diego Hidalgo • IWES**

**Dr. Bodo Groß und Katherina Grashof • IZES**

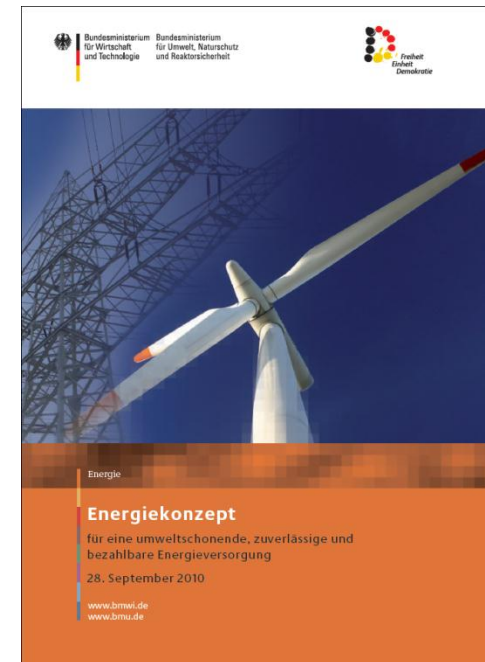
# Inhalt

- Motivation
- Thermische Energiespeicher – Technologien
- Anwendungen für die Energiewende
  - Nach Temperaturen
  - Nach Sektoren – **Beispiele!**
- Zusammenfassung

# Energiesystem der Zukunft = Energiewende

## „Energiewende“ (Energiekonzept September 2011)

- Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80 % (bezogen auf 1990) reduzieren
- 60 % des Bruttoendenergieverbrauchs kommen bis 2050 aus erneuerbaren Energiequellen (und 80 % des Stromverbrauchs!)
- Primärenergiebedarf bis 2050 um 50% (bezogen auf 2008) verringern durch Steigerung der Energieeffizienz

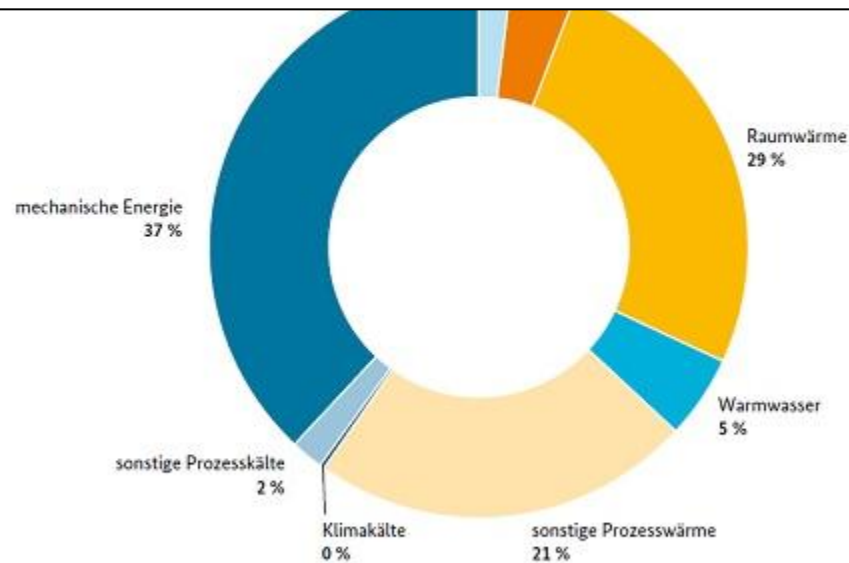


# Motivation

## Wärme und Kälte sind entscheidende Faktoren im Endenergieverbrauch!

10. Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland 2012 (insgesamt 8.998 PJ)

**57 % = Wärme und Kälte!**



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW)

# Thermische Energiespeicher - Technologien

- **Speicherung fühlbarer Wärme**



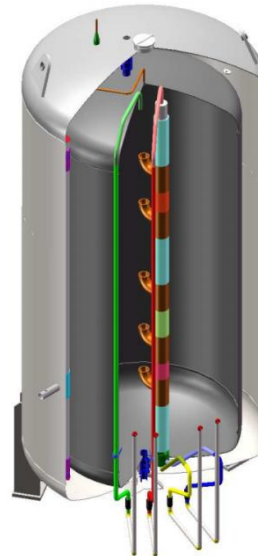
- **Speicherung latenter Wärme**



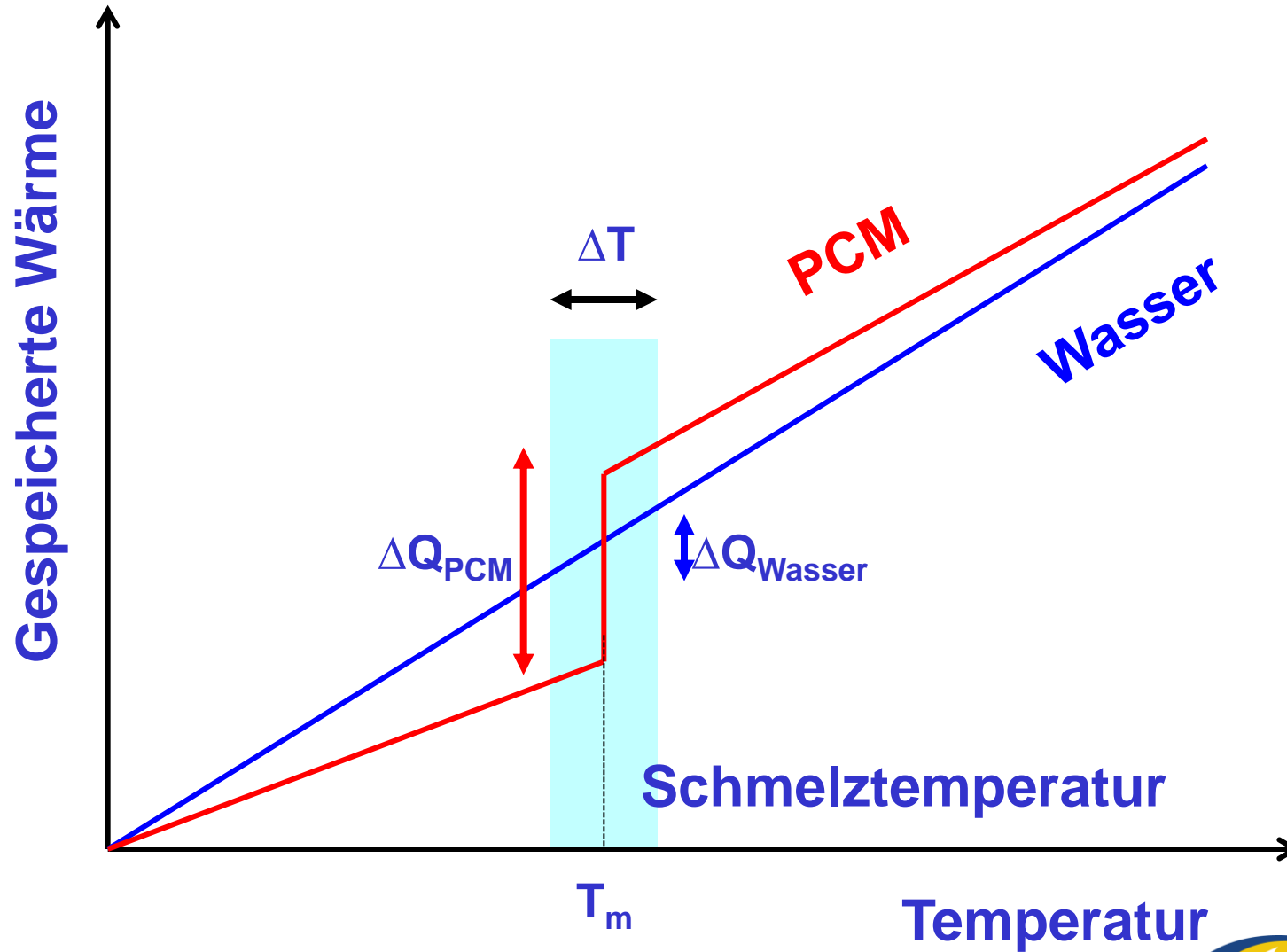
- **Thermochemische Wärmespeicherung**



## • Speicherung fühlbarer Wärme

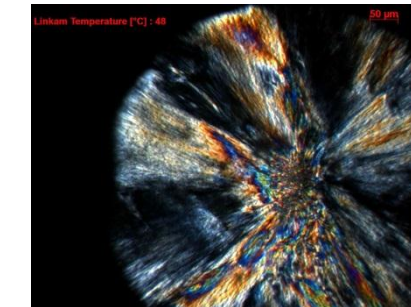
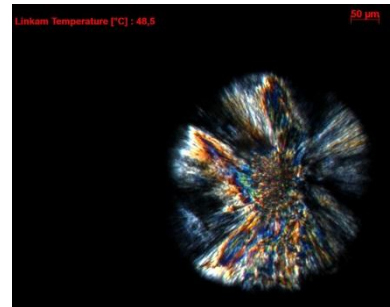
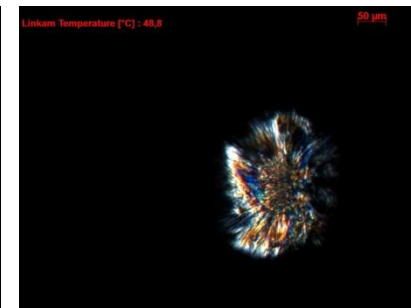


# Sensible / Latente Speicher

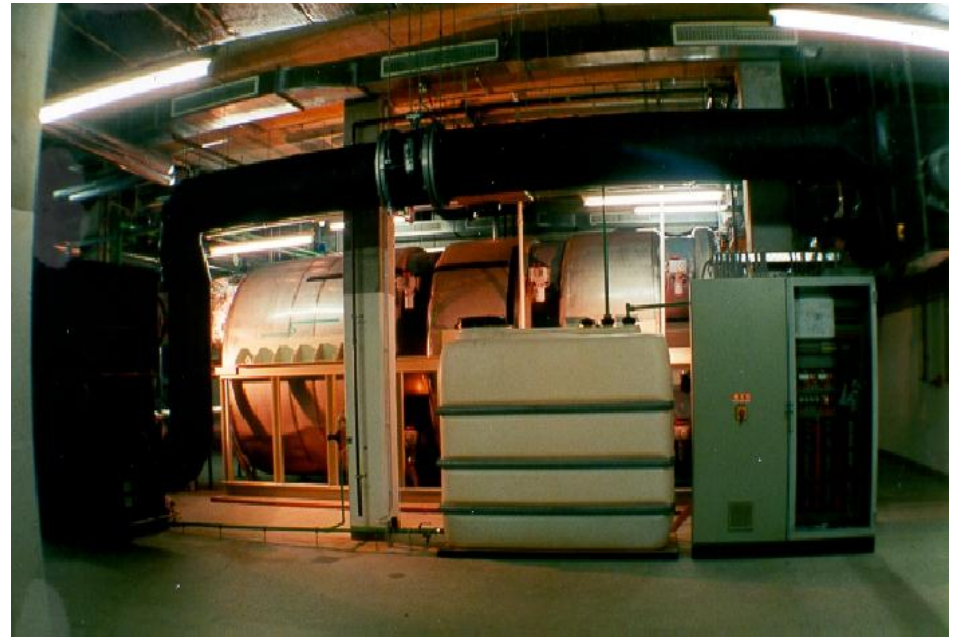
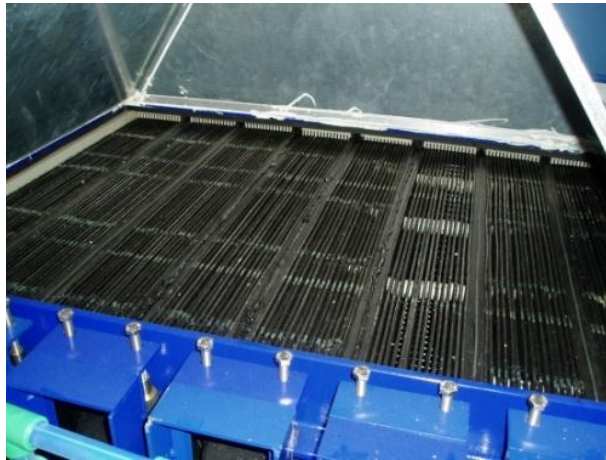




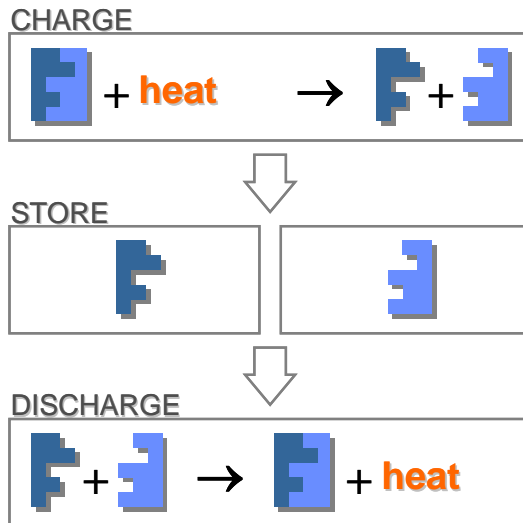
- Speicherung latenter Wärme



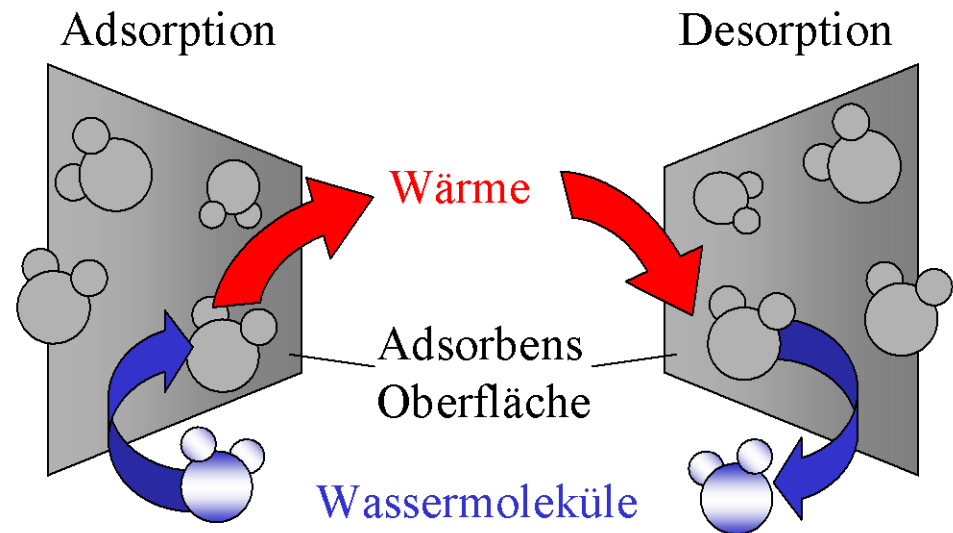
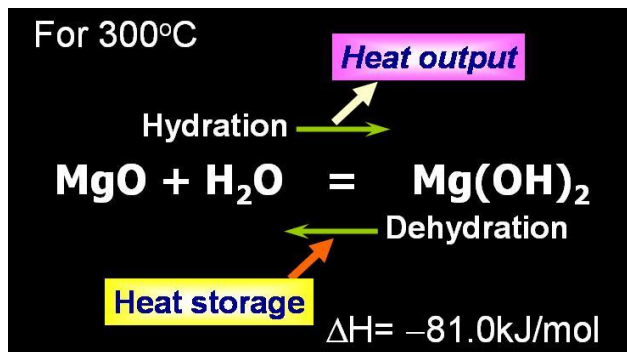
## • Thermochemische Wärmespeicherung



# Thermochemische Speicher



© ECN



# Anwendungen für die Energiewende



DLR



Fraunhofer  
IBP



Fraunhofer  
ISE



Fraunhofer  
IWES

GFZ  
Helmholtz-Zentrum  
POTSDAM

izes  
gGmbH  
Institut für ZukunftsEnergieSysteme



FVEE ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association

# Integration Erneuerbarer Energien

## Integration Erneuerbarer Elektrizität

- Netzstabilität
  - Frequenzregelung
  - Spannungshaltung
  - Leistungsausgleich/SRL
- Netzausgleich (Energie)
  - positive/negative Regelenergie
  - Peak Shaving
  - Eigenverbrauch, Inselbetrieb,...
- Demand Side Integration
  - Verschiebbare Last
  - Power to Gas
  - Power to Heat
- Sicherheit, Back-up...

## Integration Solarer Wärme

- Solarthermische Kraftwerke
- Solare Prozesswärme
- Solarthermie für Heizung/Warmwasser...

# Steigerung der Energieeffizienz

## Industrielle Prozesse

- Abwärmenutzung
- Rekuperation mechanischer Energie

## Gebäude

- Heiz- und Kühlbedarf
  - Tag/Nacht-Ausgleich
  - Sommer/Winter-Ausgleich

## Elektrizitätserzeugung

- Fossile Kraftwerke
- Kraft-Wärme-Kopplung
- ...

## Mobilität

- Antrieb
- Heizung / Klimatisierung



# Anwendungen nach Temperaturen

- Kälte ( $-18\text{ °C} - 5\text{ °C}$ )
- Klimatisierung ( $6\text{ °C} - 20\text{ °C}$ )
- Heizen / Warmwasser ( $25\text{ °C} - 70\text{ °C}$ )
- Prozesswärme ( $> 100\text{ °C}$ )
- Kraftwerksprozesse ( $> 300\text{ °C}$ )



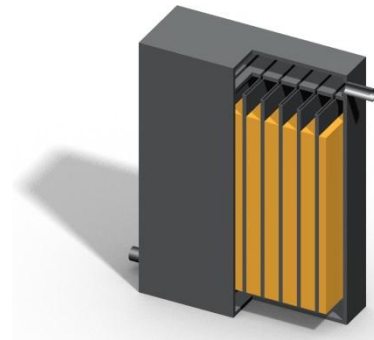
# Anwendungen nach Sektoren

- Mobilität
- Gebäude
- Industrie
- Elektrizitätserzeugung

## Beispiele aus Forschung und Entwicklung:

# Anwendungen nach Sektoren

- **Mobilität**  
Fahrzeug-Klimatisierung



**Thermomanagement für Elektrofahrzeuge: Entwicklung eines Latentwärmespeichers zur Fahrzeugklimatisierung**



# Anwendungen nach Sektoren

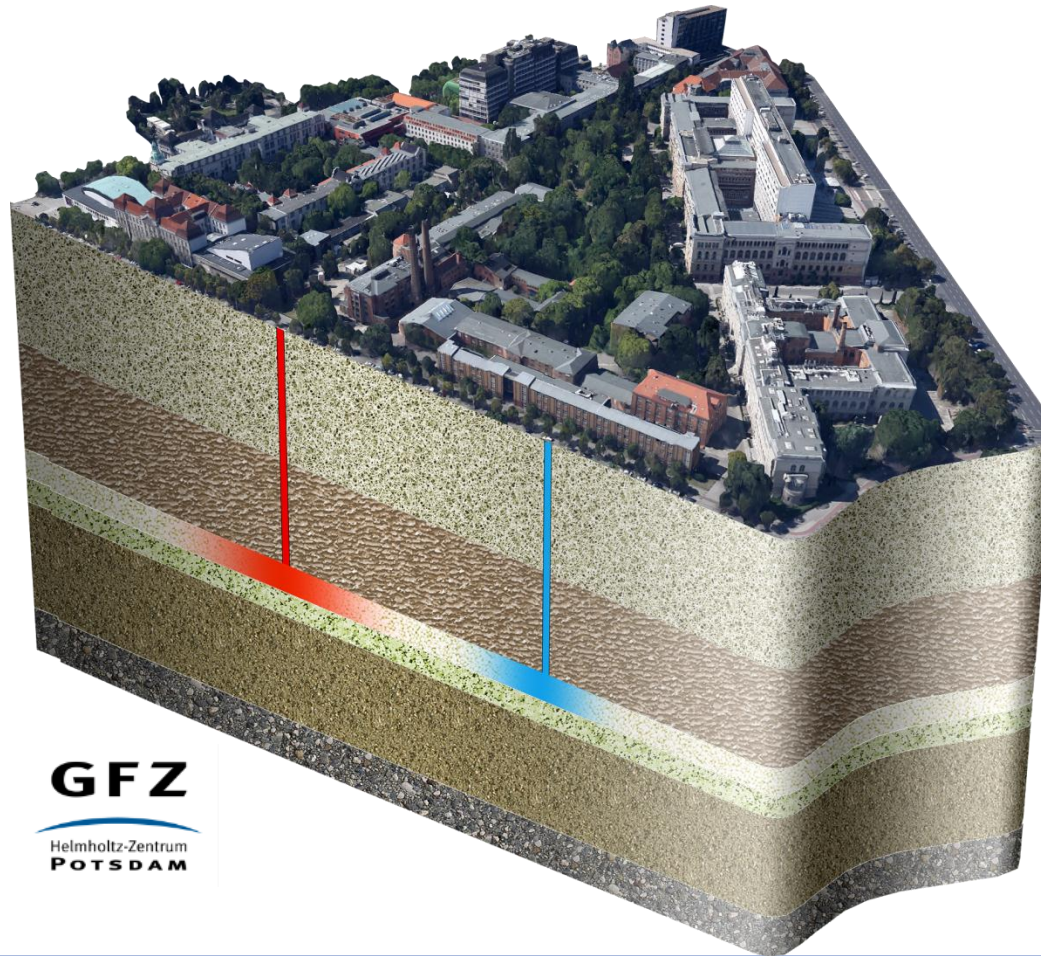
- **Gebäude**

Heizen /Warmwasser: Großes Potenzial!



**Saisonaler Warmwasserspeicher am Ackermannbogen, München**  
6000 m<sup>3</sup> Wasser, ca. 3000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche, 320 Wohnungen

# Energiesysteme für Stadtquartiere mit saisonaler Energiespeicherung in Aquiferen



## Projektziel:

- Entwicklung untergrund- und anwendungsspezifischer Speicherkonfigurationen
- optimale Integration in Energieversorgungssysteme

## Beispiel:

Universitätscampus Berlin  
Charlottenburg  
(Technischen Universität  
Berlin / Universität der  
Künste Berlin)

**GFZ**  
Helmholtz-Zentrum  
POTSDAM

# Energiesysteme für Stadtquartiere mit saisonaler Energiespeicherung in Aquiferen

## Ziele der Arbeitsschwerpunkte:

- **sicherer und umweltfreundlicher Speicherbetrieb** → Grundwasserschutz und geochemische Wechselwirkungen
- **Energieversorgung von Stadtquartieren** mit hoher Effizienz
- **Methodenentwicklung für die Planung** von Energieversorgungssystemen für Stadtquartiere mit Untergrundspeichern

## Methoden:

- Laboruntersuchungen zu **Gestein-Fluidwechselwirkungen** unter Betriebsbedingungen des Speichers
- **In Situ Tests an der Bohrung**
- Modellierung und Simulation

# Anwendungen nach Sektoren

- **Gebäude**  
Klimatisierung



**Speicherung und Umwandlung solarer Wärme/ industrieller Abwärme zur Raumklimatisierung durch offene Absorption mit flüssigen Sorbenzien.**

COP ca. 1, Speicherdichte ca. 250 kWh/m<sup>3</sup>, Antriebswärme 60-80 °C



# Nutzung Gebäude als Kälte-Speicher

## Motivation

### ■ Problematik mit stark wachsender Bedeutung

- Gebäude bieten Potenzial für Optimierung Energiesystem im dynamischen Betrieb (**Ausgleich elektrischer Lasten**)
  - **Demand Side Management (DSM)**
    - Einsatz von Speichern bzw. **Nutzung Gebäudemasse**
    - **Regelbare Verbraucher** wie Kompressionskältemaschinen
  - Zeitlich abrufbare lokale Erzeugung



**Power - to - Cold**

# Beispiel: Lastmanagement durch Klimatisierung

Studie im Projekt Strom-Wärme-Verkehr (IWES, IBP, ifeu, SEUR, Förderer BMU)

- Klimatisierungsbedarf vorwiegend im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung sowie Industrie
- PV und Klimatisierungsbedarf korrelieren gut miteinander , aber...
- Gebäude heizen sich im Laufe des Tages auf, Bedarfsspitzen für die Klimatisierung treten zeitlich versetzt nach den Spitzen der PV-Einspeisung auf.
- Nutzung der Gebäudemasse als thermischer Speicher ;
- Erhöhung der Speicherkapazität durch PCM oder Eisspeicher;
- Kostengünstige Eigenverbrauchserhöhung
- Lastspitze der KKM kann um 3 Stunden verschoben werden.

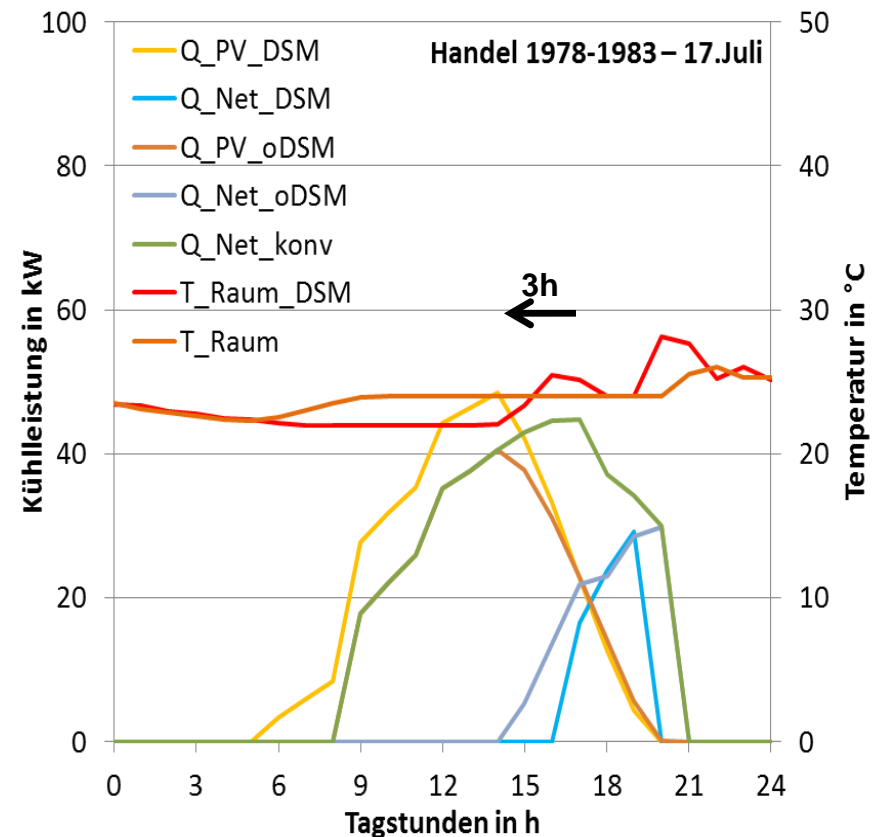
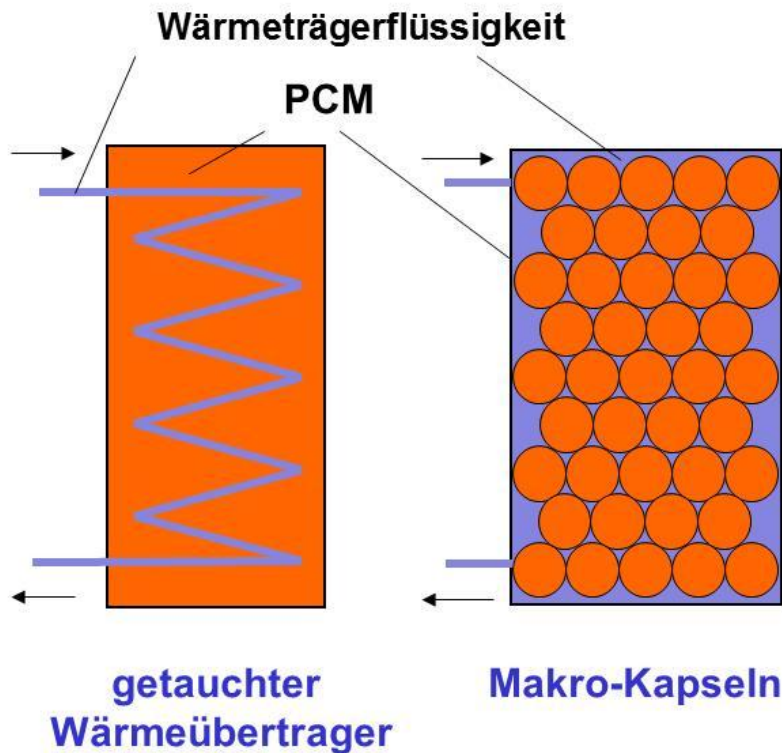


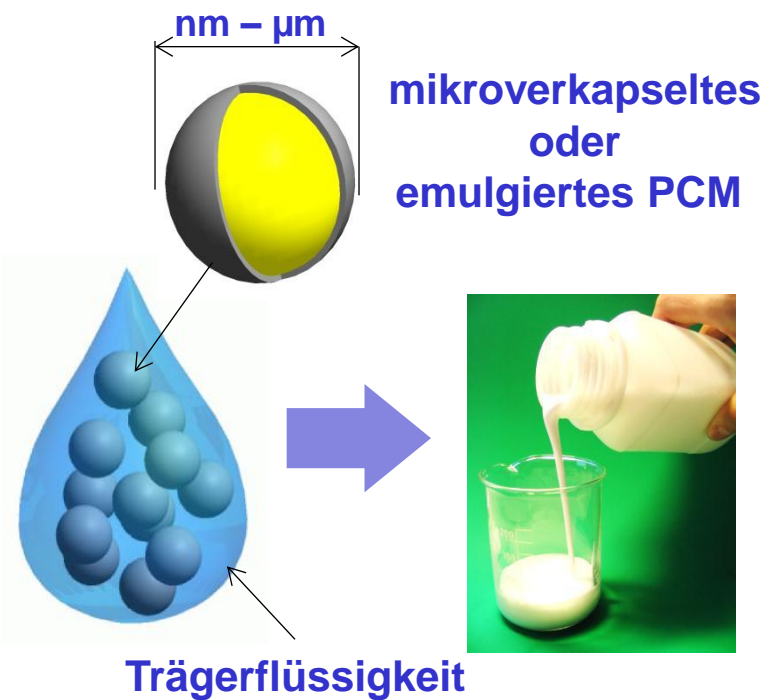
Abb. Lastmanagement bei der Klimatisierung im Einzelhandel, Toan, Schumacher, IBP

# PCM – Kältespeicher: Konzepte

„konventionell“



Phase Change Slurry (PCS)

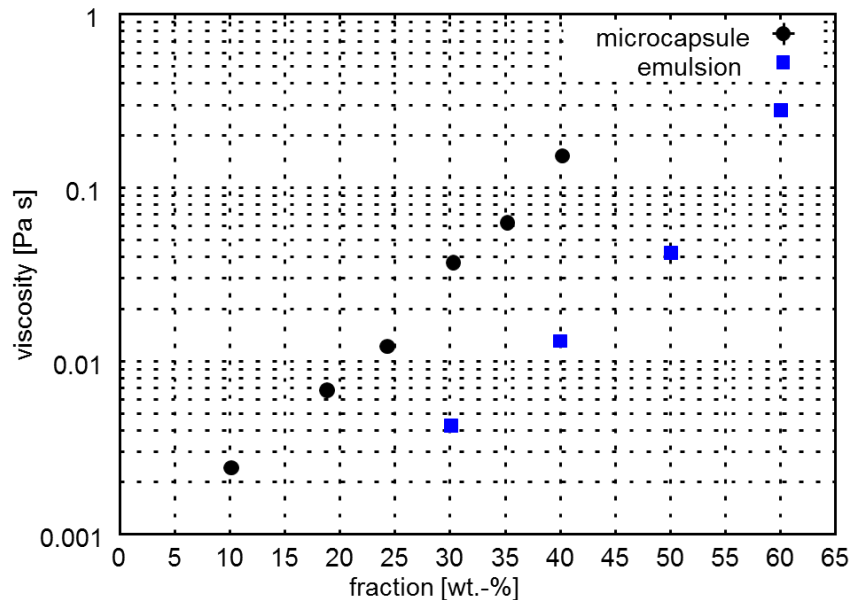
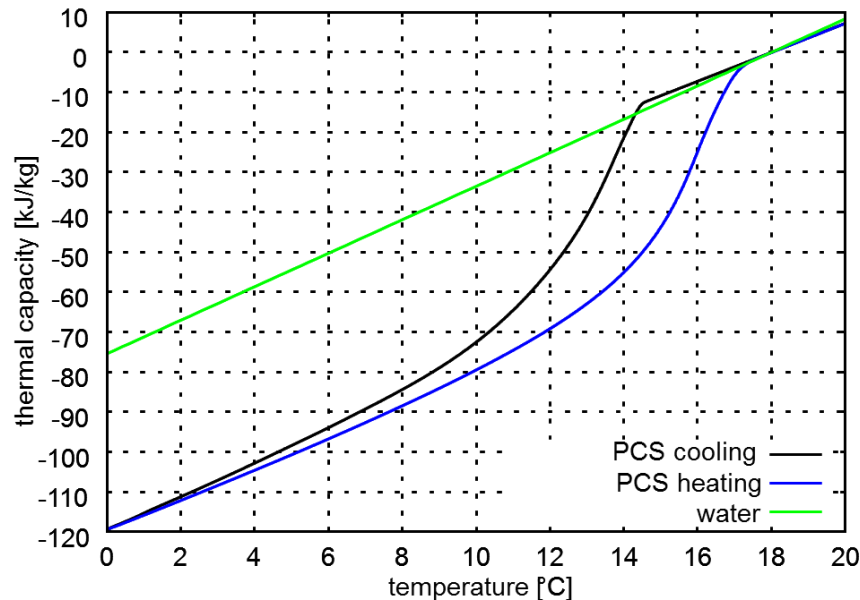


 **Fraunhofer**  
ISE



**FVEE** ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association

# PCS: Speicherkapazität und Viskosität



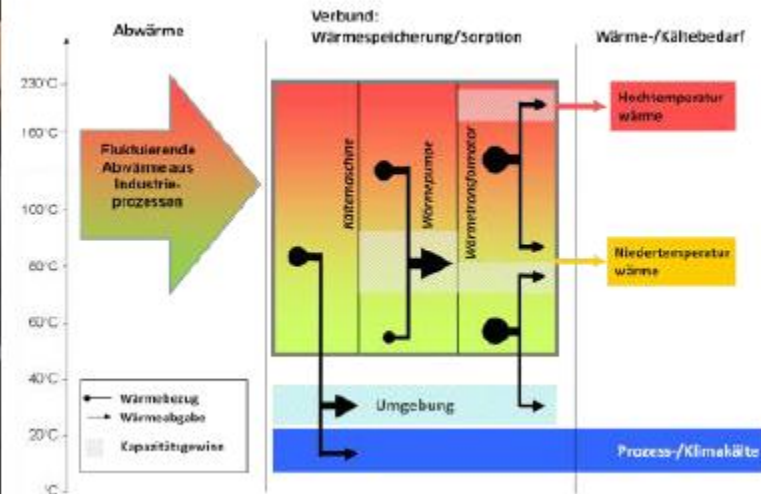
- Hohe Wärmekapazität innerhalb des Phasenübergangsbereiches
- Kapazitäten bis etwa 130 kJ/kg
- 5fache Speicherdichte von Wasser bei 6 K

- Bei Emulsionen kann ein PCM-Anteil von etwa 50 Gew.-% erreicht werden ( $\eta < 50$  mPas)



# Anwendungen nach Sektoren

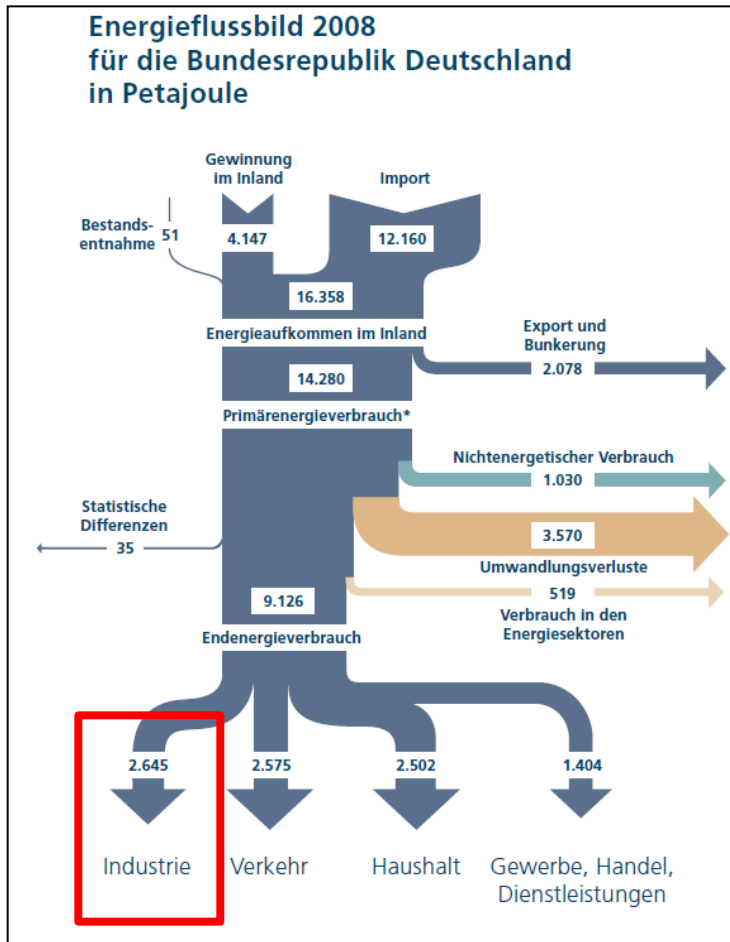
- Industrie  
Abwärmennutzung



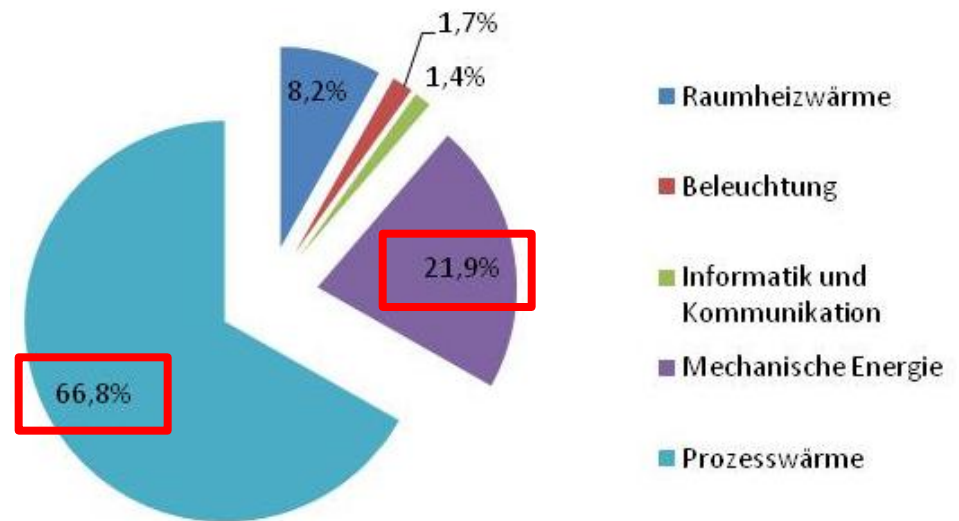
**Abwärmennutzung in der Giesserei Heunisch (Bad Windsheim)**  
Energiesystem mit innovativem Zweistoffspeicher und flexibler  
Absorptionswärmepumpe

# Primär- und Endenergieverbrauch in D 2008

**Energieflussbild 2008**  
für die Bundesrepublik Deutschland  
in Petajoule



**Prozentuale Verteilung des Endenergieverbrauchs im Sektor Industrie**



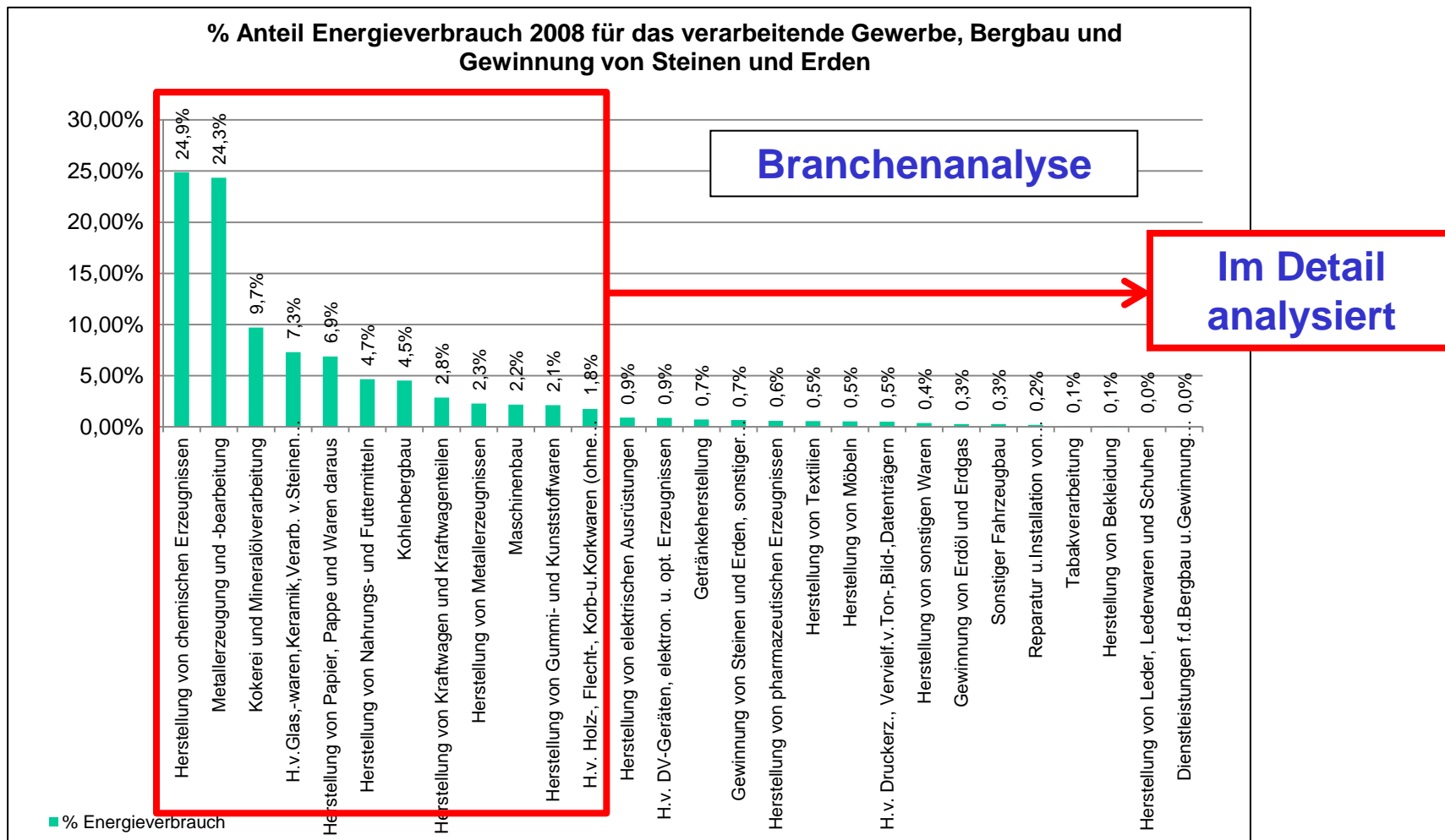
Quelle: BWK Das Energie-Fachmagazin ; „Endenergieverbrauch in Deutschland“ ; Ausgabe 06/2009 ; S. 10 ; Springer/VDI Verlag

Quelle: AG Energiebilanzen e.V.



**FVEE** ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association

# Energieverbrauch in der Industrie



Quelle: Stat. Bundesamt ; Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden; Deutschland 2008

# Ergebnisse

Spartenspezifisch und temperaturabhängig gemittelte Abwärmepotentiale:

Es steht ein theoretisches Potential von etwa **255 TWh/a** zur Verfügung

- i. Für die reine **Nutzwärmeerzeugung** (nur NT, inklusive der Abwärme aus MT und HT) beträgt das Potential etwa **203 TWh/a**; CO<sub>2</sub>-Einsparung: ~ 55 Mio. t CO<sub>2</sub>äq/a
- ii. Die theoretisch erzeugbare maximale **Strommenge** (nur MT und HT) beträgt etwa **33 TWh/a**; CO<sub>2</sub>-Einsparung: ~ 20 Mio. t CO<sub>2</sub>äq/a

NT = Niedertemperatur ; MT = Mitteltemperatur ; HT = Hochtemperatur

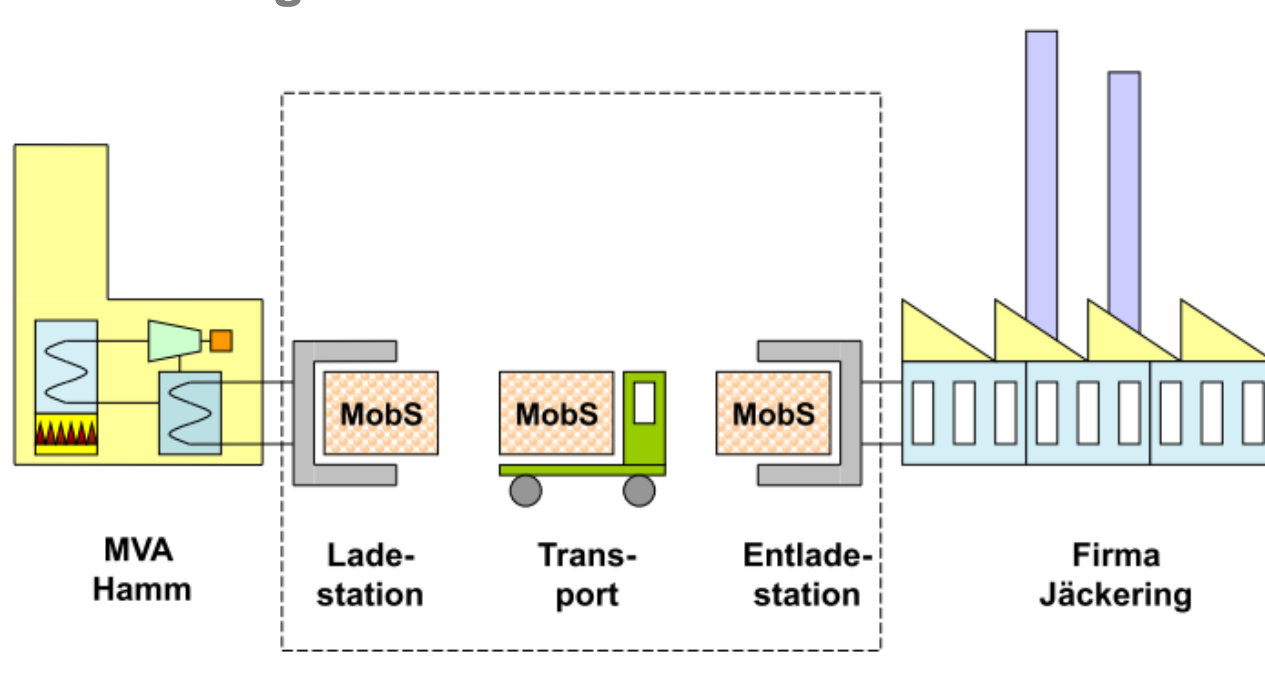
Der Gesamtenergiebedarf der deutschen Haushalte für Heizwärme betrug im Jahr 2008 etwa **450 TWh**.

Nach der Studie könnten bei vollständiger Nutzung des Abwärmepotentials etwa **45 %** Abdeckung des Energiebedarfs für Heizwärme erreicht werden.

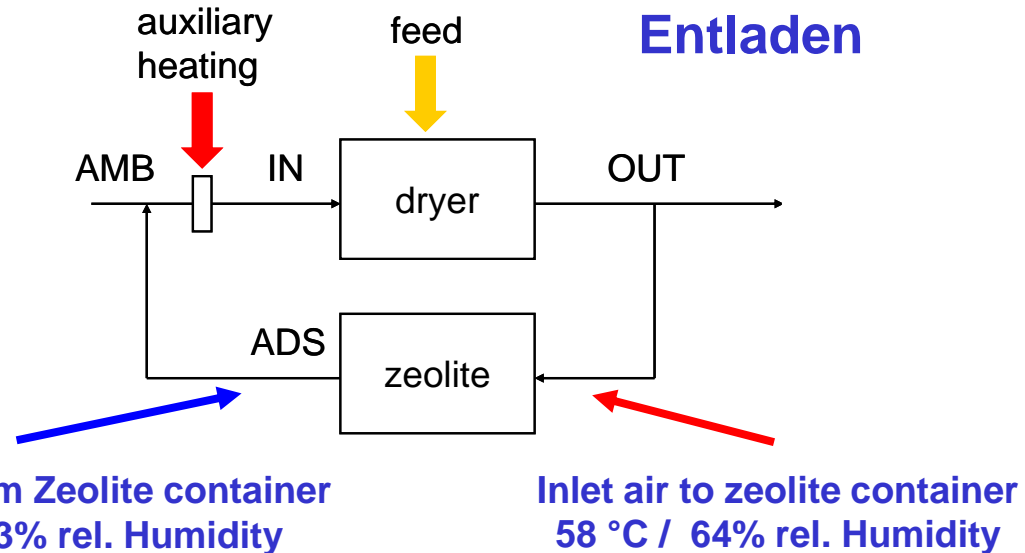
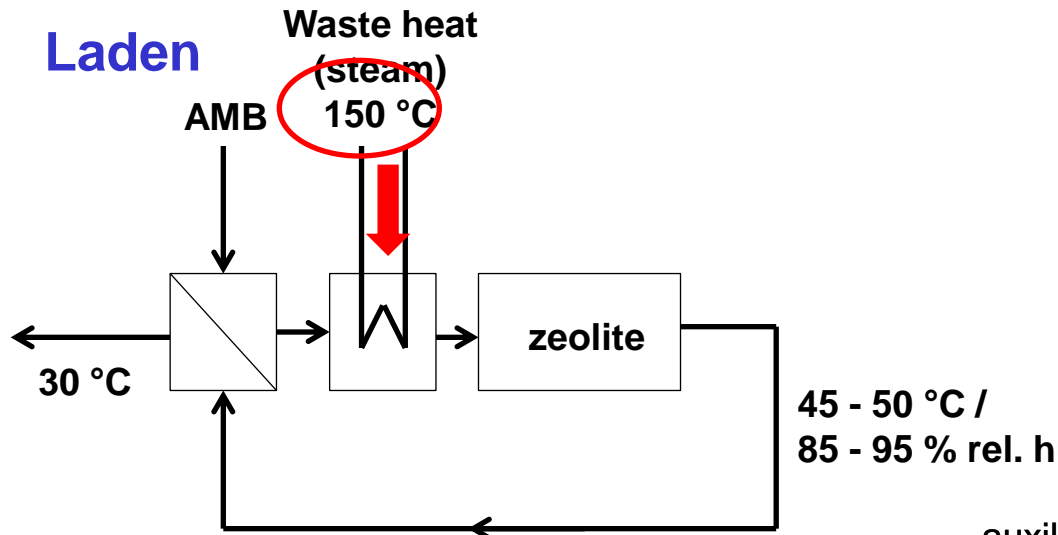
# Mobiler Sorptionsspeicher zur Nutzung industrieller Abwärme



- Zeitliche und örtliche Verschiebung möglich
- Flexibler Wärmetransport (vgl. Fernwärmeleitung)
- Hohe Speicherkapazität und thermische Leistung durch Sorptionstechnologie



# Speicherprozess







# Anwendungen nach Sektoren

- **Elektrizitätserzeugung und -bereitstellung**

Intelligente Steuerung von **BHKW mit thermischen Speicher** zur Eigenverbrauchsoptimierung bzw. Einspeisung zu Hochtarifzeiten sowie zur Entlastung des Niederspannungsnetzes mit

- BHKW mit Pufferspeicher
- Elektroheizstäbe im Pufferspeicher



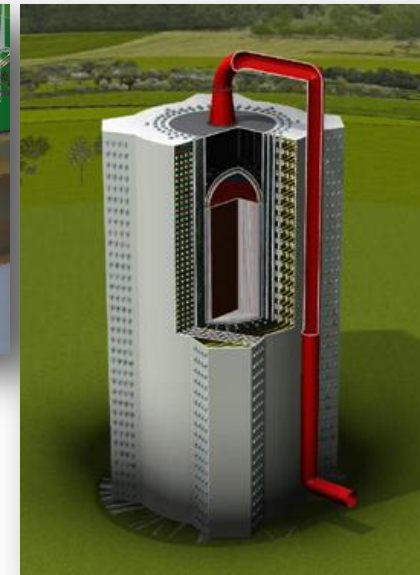
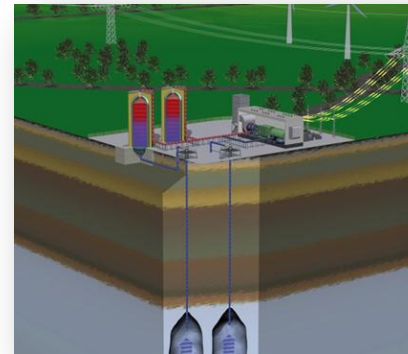
Bild: ASUE e.V. / SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH



# Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke

## ADELE-Konzept

- Stromspeicherung im Kraftwerksmaßstab  
→ Netzintegration erneuerbarer Energien
- Hoher Wirkungsgrad durch Integration eines thermischen Energiespeichers  
→ ~70 % Strom-zu-Strom (statt 50 %)
- **Regenerator-Speicher:**
  - Maximal-Temperatur: 400-550 °C
  - Wärmeträger: Druckluft bei ca. 65 bar
  - Wärmeleistung ca. **300 MW**
  - Kapazität: ca. **1,2 GWh** für 4 Turbinen-Stunden



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Optimierungsbasierte Betriebsführungsstrategien für PV-Wärmepumpen-Speichersysteme

## Hintergrund:

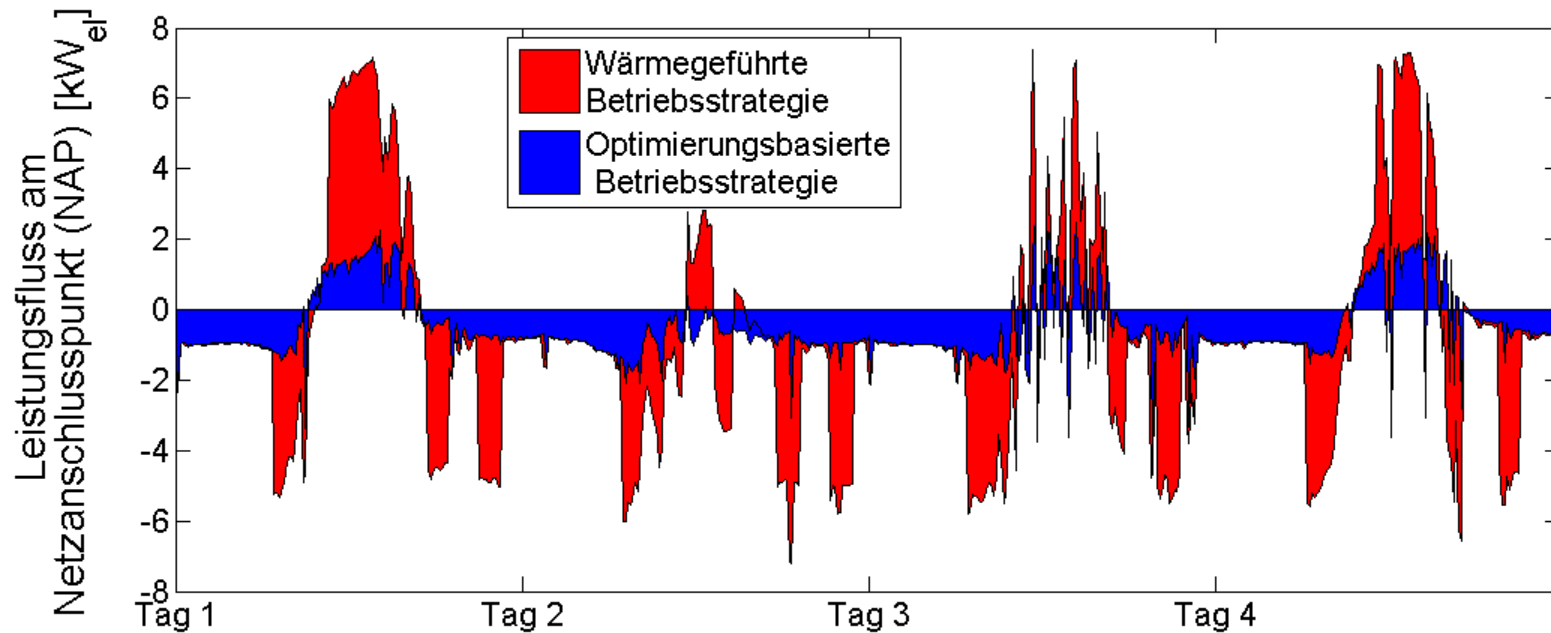
- Rein wärmegeführte PV-Wärmepumpen-Systeme erhöhen **nicht** zwangsläufig den PV-Eigenverbrauch und behalten sich nicht netzdienlich

## Ansatz:

- Optimierungsbasierte Betriebsführung der Wärmepumpe und des **Wärmespeichers** zur Erhöhung des Eigenverbrauchs bei gleichzeitiger Sicherung des Temperaturkomforts
- Einsatz eines modellprädiktiven Ansatzes, um kontinuierlich Fahrplanabweichungen auszuregeln
- Performance-Vergleich von wärmegeführten, regelbasierten und optimierungsbasierten Betriebsführungsstrategien



# Optimierungsbasierte Betriebsführungsstrategien für PV-Wärmepumpen-Speichersysteme

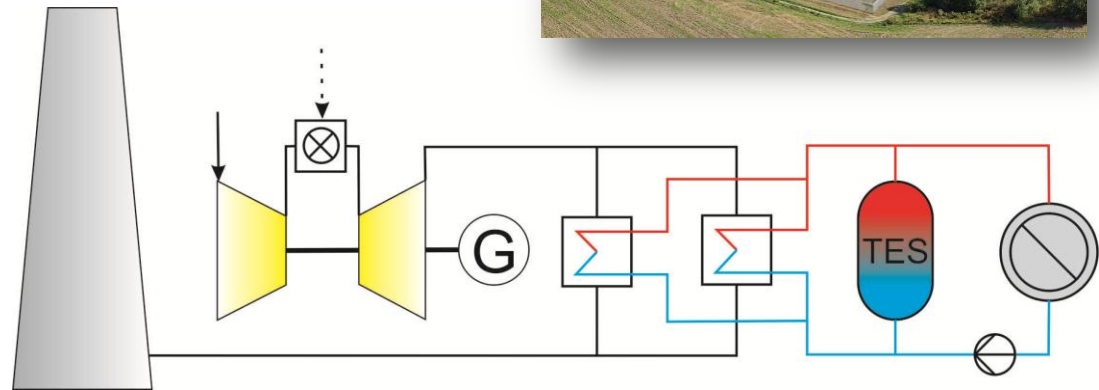


## Ergebnisse:

- Einspeise- und Lastspitzen können durch die optimierungsbasierten Betrieb des Wärmepumpen-Speichersystems deutlich reduziert werden
- Verbesserung der PV-Netzintegration bei erhöhtem PV-Eigenverbrauch und keinem Komfortverlust

# Dampfbesicherung im Heizkraftwerk in Kooperation mit STEAG New Energies GmbH

- Analyse des Potenzials der Speicherintegration zur Effizienzsteigerung von mehr als 200 Anlagen
- Speichereinsatz sinnvoll bei Heizkraftwerk mit angeschlossenem Dampfnetz
- Kostengünstige Vorhaltung von Leistungsreserven
- Entwicklung und on-site Demonstration eines **Latentwärmespeichers**
- Temperaturniveau 300 °C
- Leistung **6 MW**
- Kapazität **15 MWh**
- Fertigstellung und Betrieb in 2015



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Regelbarer Strom aus Solarthermischen Kraftwerken

## mittels thermischer Energiespeicherung

- Kommerziell im Einsatz: **Flüssigsalzspeicher**
  - Direkte und indirekte Systeme
  - 50 MW elektr. Leistung, 700 bis 1000 MWh
- Im Pilotmaßstab getestet: **Latentwärmespeicher**
  - Ideal für Systeme mit Direktverdampfung
- Zukunfts-Option: **Thermochemische Speicher**
  - Kalk als kostengünstiges Speichermaterial
  - Bewegtes Reaktionsbett zur Entkopplung von Leistung und Kapazität
  - Demonstration im 10 kW-Maßstab in 2016



# Zusammenfassung

# Was können TES für die Energiewende leisten?

➔ Was wir brauchen ist zu 60 % Wärme und Kälte!

➔ Viele thermische Speicher-Technologien stehen zur Verfügung oder sind in der Forschung und Entwicklung

➔ Es gibt viele Anwendungen mit großen Potenzialen in den Bereichen Erneuerbarer Energien und Energieeffizienz für thermische Energiespeicher

➔ Innovative Ansätze wie Power-to-Cold, Abwärmenutzung in der Industrie durch mobile Wärmespeicher oder Hochtemperaturspeicher bei der Stromerzeugung erweitern Einsatzpotenziale

➔ Thermische Energiespeicher sind eine wirtschaftlich sehr günstige Speicherlösung



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



DLR



Fraunhofer  
IBP



Fraunhofer  
ISE



Fraunhofer  
IWES

GFZ  
Helmholtz-Zentrum  
POTSDAM

izes  
Institut für ZukunftsEnergieSysteme



FVEE ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association